

*А.О. Гуржій, аспірант
Полтавський національний технічний
університет імені Юрія Кондратюка*

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ДАМБИ ХВОСТОСХОВИЩА НА ПРИКЛАДІ ПОЛТАВСЬКОГО ГЗК

Проаналізовано результати моделювання дамби хвостосховища при розширенні-спорудженні подвійних карт за допомогою методу скінчених елементів на прикладі Полтавського гірничо-збагачувального комбінату, м. Комсомольськ.

Ключові слова: *хвости, гранулометричний склад, дамба, хвостосховище, математичне моделювання, деформація, коефіцієнт стійкості.*

*А.А. Гуржій, аспірант
Полтавський національний технічний
університет імені Юрія Кондратюка*

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА НА ПРИМЕРЕ ПОЛТАВСКОГО ГОК

Проанализированы результаты моделирования дамбы хвостохранилища при расширении-сооружении двойных карт с помощью метода конечных элементов на примере Полтавского горно-обогатительного комбината, г. Комсомольск.

Ключевые слова: *хвосты, гранулометрический состав, дамба, хвостохранилище, математическое моделирование, деформация, коэффициент устойчивости.*

*А.А. Gurhiy, graduate student
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

SIMULATION RESULTS TAILINGS DAMS FOR EXAMPLE POLTAVA MINING CONCENTRATION PLANT

The results of modeling of the tailings dam construction during the expansion-card double by the finite element method on the example of Poltava Mining Concentration Plant, Komsomolsk.

Keywords: *tails, grain size, dam, tailings, mathematical modeling, deformation, stability factor.*

Вступ. На території Полтавського гірничо-збагачувального комбінату за останні роки накопичилися величезні запаси відходів збагачення залізної руди, які прийнято називати «хвостами» [1]. Звісно, що підприємству необхідно підвищувати вилучення корисних компонентів. Тому і на Полтавському ГЗК існує постійна тенденція до здрібнювання вихідного матеріалу для кращого розкриття мінеральних зерен. У зв'язку із закономірним зменшенням гранулометричного складу хвостів, що викликано підвищенням ефективності збагачення залізородних кварцитів на різних етапах виробництва, підвищується небезпека втрати стійкості огорожувальних дамб та знижується їх стійкість при накопиченні у хвостосховищі.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Для підвищення надійності дамб обгородження хвостосховища було прийняте рішення про

розширення-спорудження подвійних карт [2, 3]. У зовнішній карті наминаються більші, а у внутрішній – дрібніші за гранулометричним складом фракції хвостів.

Виділення не розв’язаних раніше частин загальної проблеми. Необхідно переконатися в правильності прийнятого рішення про розширення-спорудження подвійних карт, що було прийняте для підвищення надійності дамб обгородження хвостосховища.

Тому за мету роботи прийнято дослідження впливу різних за гранулометричним складом і характерним розташуванням хвостів на деформації та стійкість дамби хвостосховища методом скінченних елементів (МСЕ) в плоскій постановці з використанням достатньо апробованого програмного комплексу Plaxis 2D.

Основний матеріал і результати. Збагачувальна фабрика Полтавського ГЗК із 1970 по 2002 рік обробляла руду за технологією магнітного збагачення. До 1997 року була можливість забезпечити нормативні вимоги при картовому намиванні «хвостами» такого на той час гранулометричного складу рис.1. Після 1997 р. крива гранулометричного складу перемістилася. «Хвостами», що надходили зі збагачувальної фабрики, стало неможливо намивати огорожувальні дамби.

У грудні 2002 року на комбінаті вперше в Україні й у країнах СНД було освоєно технологію флотації залізних руд і введено в експлуатацію ділянку флотаційного доведення концентрату. Таким чином, гранулометричний склад «хвостів» зменшувався з удосконаленням методу збагачення. Так, середній розмір частинок на початку роботи ГЗК складав 0,12 мм, десять років тому – 0,09 мм при вдосконаленому методу магнітної сепарації, а з уведенням флотації – 0,029 мм. На сьогодні відклади Полтавського ГЗК до 90% складені пилюватими частинками силікатних порід.

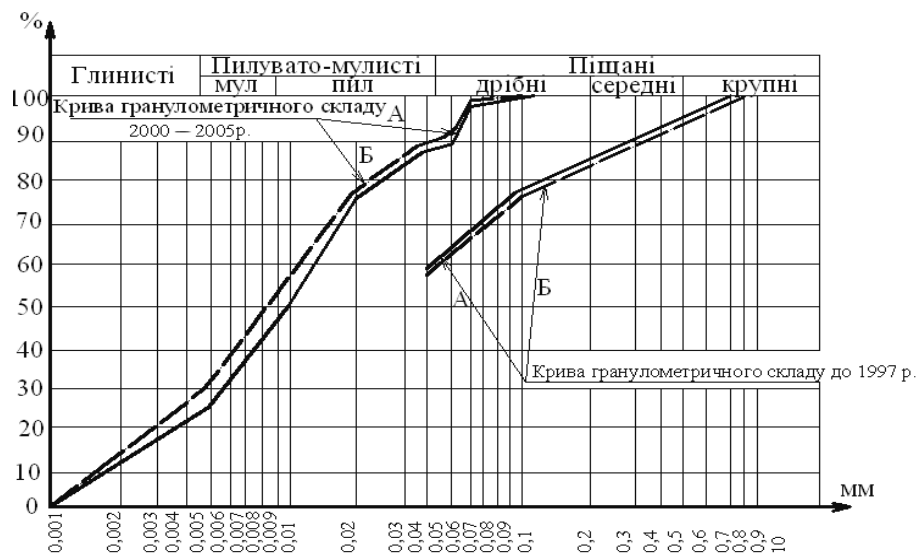


Рис. 1. Криві гранулометричного складу «хвостів» комбінату:
 А – крива гранулометричного складу «хвостів» збагачувальної фабрики № 1;
 Б – крива гранулометричного складу «хвостів» ЗФ-2

У червні 2000 року були відібрані проби хвостів на території хвостосховища безпосередньо з його поверхні, яка у той час знаходилася на висоті близько 26,0 м вище від поверхні землі. Дослідження гранулометричного складу «хвостів» виконували у лабораторії геотехніки ПолНТУ. Результати досліджень наведено в табл.1.

Таблиця 1. Гранулометричний склад хвостів

Діаметр фракцій, мм	> 0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	< 0,002
Кількість, %	0,6	16,5	26,1	55,4	1,4

Отже, за даними таблиці 1 у складі «хвостів» переважають пилюваті частинки – 81,5%, піщаних частинок у пробах зафіксовано 17,1%, а глинистих – 1,4% [4].

У 1998 році виникла проблема нарощування дамб обвалування картовим намиванням по всьому контуру відсіку з довжиною 9,0 км. Через недолік динамічно стійких хвостів (більшого гранулометричного складу) довелося зменшити ширину карт до 70 м. Однак і в цьому випадку забезпечити намивання динамічно стійкими фракціями не вдавалося.

У 2000 році в процесі замивання карти відбулося обвалення зовнішньої первинної дамби і за півгодини з карти витекло 75,0 тис. м³ води, утворився проран глибиною 15,3 м і середньою шириною 44,0 м. Поток води було винесено 49,8 тис. м³ «хвостів» і піску, з якого споруджено дамбу.

Тому для підвищення надійності дамб обгородження хвостосховища було прийняте рішення про розширення-спорудження подвійних карт (рис.2). Спосіб складування відходів полягає в укладанні міцних ґрунтів у дамби і заповненні простору між ними зі створенням протифільтраційного елемента. Дамби зводять зі скельних розкривних порід до заданої висоти, потім на вершині зовнішньої від осі хвостосховища дамби створюють каналу і за пульповодом подають до неї «хвости». Після цього у простір між дамбами подають «хвости» меншого гранулометричного складу, що мають розміри твердих часток $5 \cdot 10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-9}$ м. Одночасно у тіло внутрішньої від осі хвостосховища дамби подають «хвости» та заповнюють простір до найбільшої можливої по висоті відмітки, після чого дамби нарощують розкривними породами, розширюючи їхні відкоси вбік простору між дамбами, і цикл повторюють.

Гранулометричний склад як найважливіший класифікаційний показник ґрунту дозволяє вирішити питання про його природу, ступінь однорідності, ступінь агрегованості (за даними мікроагрегатного та дисперсного аналізів) і колоїдної активності. За впливом окремих факторів на механічні характеристики піщаних ґрунтів гранулометричний склад виділено як один із найбільш важливих показників [4].



Рис. 2. Розширення-спорудження подвійних карт хвостосховища

Визначення фізичних і механічних властивостей ґрунтів виконували у лабораторії геотехніки ПолНТУ за ДСТУ Б В.2.1-2-96 «Ґрунти. Класифікація», ДСТУ Б В.2.1-3-96 «Ґрунти. Лабораторні випробовування. Загальні положення», ДСТУ Б В.2.1- 4-96 «Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформативності», ДСТУ Б В.2.1-5-96 «Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробовувань».

На першому етапі визначався гранулометричний склад і ступінь неоднорідності ґрунту згідно з ДСТУ Б В.2.1-2-96. За ними встановлювалася його назва (для незв'язних чи малозв'язних ґрунтів). Для визначення гранулометричного складу ґрунту використано ситовий аналіз.

Потім визначалися величини фізичних властивостей: щільність ґрунту ρ , його частинок ρ_s і скелета ρ_d ; вологість w ; вологість на межі розкочування W_p та текучості W_L ; число пластичності I_p ; показник текучості I_L . На базі цих даних встановлювали назву ґрунту за ДСТУ Б В.2.1-2-96. Деформаційні показники визначалися шляхом ущільнення зразків ґрунту під тиском без можливості бічного розширення. Дослідження проводилися на приладі для компресійних випробувань

КПР-1. Випробування виконували ступеневим прикладанням тиску $\sigma = 0,025; 0,05; 0,10; 0,20; 0,30$ МПа. Кожний ступінь витримували до умовної стабілізації деформації 0,01 мм за 16 годин, після чого прикладали нове навантаження. За одержаними результати будували компресійну криву й розраховували значення модуля деформації E .

Для зразків ґрунту проводили penetраційні дослідження. Після компресії та penetрації зразки випробували у приладі одноплощинного зрушення ПСГ-2М. За даними серії випробувань отримували графік у координатах « $\tau - \sigma$ ». За цими даними обраховували значення c та ϕ .

Коефіцієнт Пуассона ν приймався відповідно до ДСТУ Б В.2.1-4-96:

0,30 – 0,35 – для пісків і супісків; 0,35 – 0,37 – суглинків; 0,2 – 0,3 – глини при $I_L < 0$; 0,3 – 0,38 – глини при $0 \leq I_L \leq 0,25$; 0,38 – 0,45 – глини при $0,25 \leq I_L \leq 1,0$. При цьому менші значення ν приймалися при більшій щільності ґрунту. З фізичних характеристик ґрунту задавалася його питома вага γ (кН/м³).

Гранулометричний склад – найважливіший структурний показник ґрунту, від нього залежать значення кута внутрішнього тертя (φ), зчеплення (c) й модуля деформації (E). Коли зменшується гранулометричний склад, збільшується зчеплення; зменшуються значення кута внутрішнього тертя та модуля деформації, що й було використано для розрахунків [6].

У таблиці 2 наведено визначені в лабораторії вихідні дані, що були використані для розрахунків за програмним комплексом PLAXIS 2D.

Розрахунок напружено-деформованого стану ґрунтового масиву з використанням ПК PLAXIS виконано ітераційним методом за моделлю Мора – Кулона. Вона використовується для першого наближеного стану ґрунта. Модель містить п'ять параметрів: модуль Юнга (E), коефіцієнт Пуассона (ν), зчеплення (c), кут внутрішнього тертя (φ) і кут делатансії (ψ). Крім вищеперелічених параметрів, у програмі враховуються об'ємна вага ґрунту в сухому (g_{sat}) та водонасиченому ($gsat$) станах, а також коефіцієнти фільтрації K_x і K_y .

Таблиця 2. Характеристика матеріалів прошарків ґрунту

№ з/п	Назва шару	Товщина шару, м	Питома вага ґрунту γ , кН/м ³	Модуль деформації E , МПа	Питоме зчеплення ґрунту c , кПа	Кут внутр. тертя φ , °	Коефіцієнт Пуассона ν
1	Скеля	>2000	30	60	0	43	0,26
2	Пісок з уламками кристалічних порід	5	13,5	28	1	25	0,3
3	Алеврит супіщаний середньої міцності	3	22,65	12	30	25	0,2
4	Пісок малої міцності	3	15,5	18	1	20	0,3
5	Алеврит супіщаний середньої міцності	2	22,65	12	30	25	0,2
6	Піщаник середньої міцності	3	13,5	28	11	20	0,25
7	Алеврит суглинистий	3	20,0	14	40	18	0,3
8	Алеврит супіщаний середньої крупності	5	22,65	12	30	25	0,2
9	Пісок середньої крупності	4-9	13,5	25	1	18	0,3
10	Пісок мілкий	2-11	15,5	18	1	20	0,3
11	Суглинок	0-1,2	16,6	14	29	14	0,35
12	Ґрунтовий шар	0-0,8	17,9	2	26	8	0,2
13	Супісок неоднорідний	3	19,4	12	11	25	0,3
14	Пісок мілкий	0-11	15,5	18	1	20	0,3

15	«Хвости» супіщані	3	18,5	14	2	22	0,3
16	«Хвости» суглинисті	2	16	11	8	16	0,3
17	«Хвости» піщані	2	15,5	18	2	20	0,3
18	«Хвости» піщані середньої крупності	2	13,5	20	2	22	0,3
19	«Хвости» суглинисті	2	16	11	8	16	0,3
20	«Хвости» супіщані	2	18,5	14	2	22	0,3
21	«Хвости» суглинисті	2	16	11	8	16	0,3
22	«Хвости» супіщані	2	18,5	14	2	22	0,3
23	«Хвости» піщані	2	15,5	18	2	20	0,3
24	«Хвости» суглинисті	3	16	11	8	16	0,3
25	Уламки кварцитів	1	18	40	0	40	0,35

Розрахункова схема являє собою плоску сітку скінченних елементів. Прийнято такі граничні умови: по бічних гранях відсутні горизонтальні переміщення, по нижній грані немає горизонтальних і вертикальних переміщень, верхня частина вільна від обмежень.

При розрахунках стійкості схилів хвостосховищ ураховується послідовність зведення дамб обвалування. Особливістю хвостосховищ є те, що під час будівництва та їх експлуатації ґрунти знаходяться в контактi з водою.

Особливістю розрахунків стійкості дамб хвостосховищ є те, що при розрахунках необхідно приймати характеристики ґрунтів при повному водонасиченні. Це пов'язано з тим, що ґрунти тіла дамб хвостосховищ знаходяться у водонасиченому стані. Вода впливає на величину напружень і на міцність ґрунтів тіла дамб [7].

Крім того, тривале водонасичення ґрунтів призводить до зменшення фізико-механічних характеристик ґрунтів (кута внутрішнього тертя – φ та зчеплення ґрунту – c), що може призвести до втрати стійкості укосів дамб хвостосховищ. Тому при розрахунках стійкості дамб хвостосховищ необхідно приймати значення φ та c з урахуванням водонасичення ґрунтів.

На рисунках 3 – 6 наведено ізополі деформацій та епюри вертикальних та горизонтальних переміщень системи.

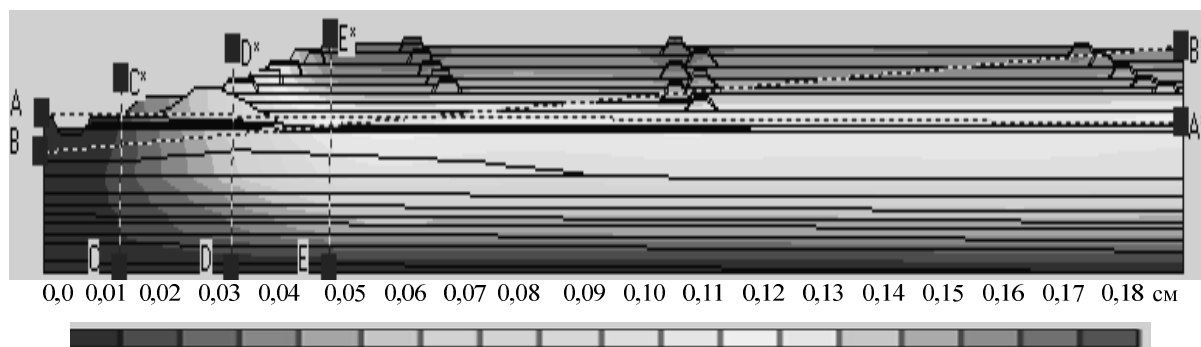


Рис. 3. Ізополі вертикальних (S_z) деформацій дамби при її самоущільненні

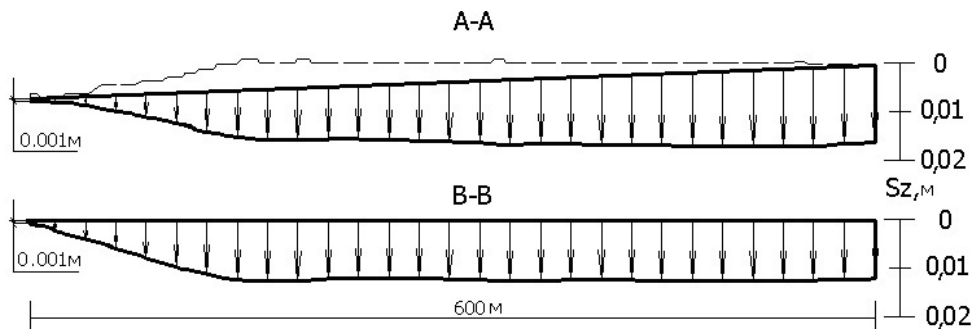


Рис. 4. Епюри вертикальних (S_z) переміщень основи та поверхні дамби при її самоущільненні відповідно до розрізів А-А, В-В

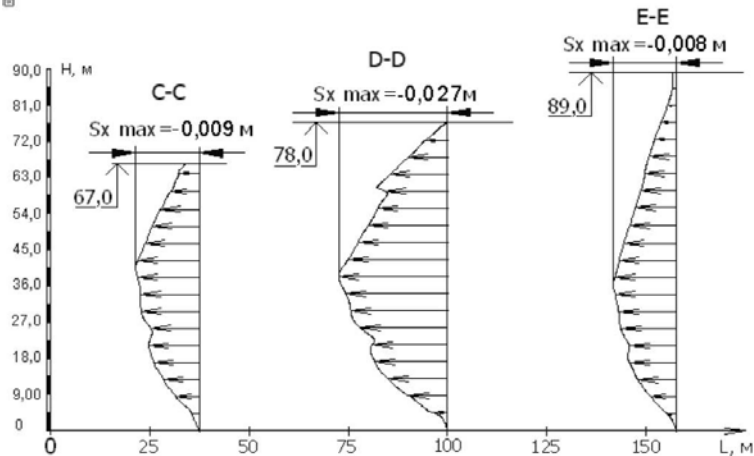


Рис. 5. Епюри горизонтальних (S_x) переміщень відповідно до розрізів С-С, D-D, E-E

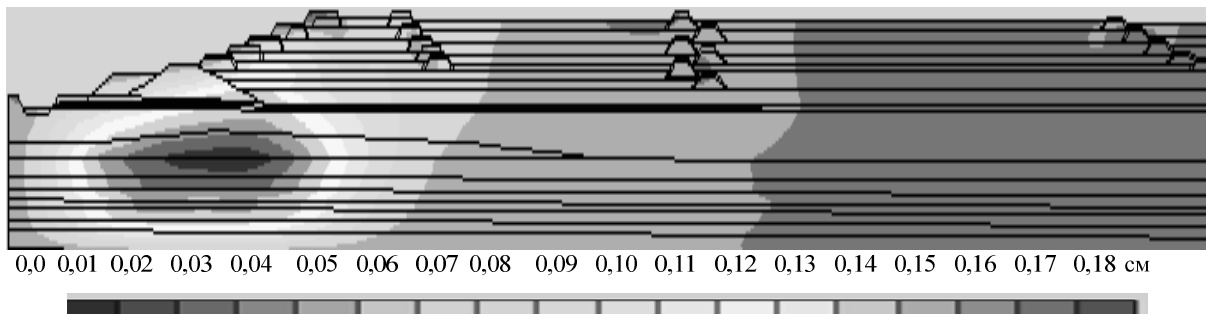


Рис. 6. Ізополя горизонтальних (S_x) переміщень відповідно до розрізів С-С, D-D, E-E.

Розрахунки виконували за розрахунковою схемою: дамбу наміто у зовнішній карті більш крупними фракціями хвостів (за розмірами часток від 0,1 до 0,01 мм), а у внутрішній – більш дрібними фракціями (за розмірами часток від 0,01 до 0,002 мм).

У результаті розрахунків отримано такі дані:

1) в основі хвостосховища одержано менші вертикальні переміщення $S_z = 0,012$ м (рис. 3 і 4) порівняно з його поверхнею – $S_z = 0,018$ м;

2) за умов зволоження ґрунтового масиву схилу відбувається перерозподіл напружень, та найнебезпечнішою стає поверхня підніжжя дамби (розріз D-D), там зосереджуються найбільші горизонтальні деформації. Максимальне переміщення $S_x = -0,027$ м (рис.5 і 6);

3) коефіцієнт стійкості складає $K_{st} = 1,32$. Дамби хвостосховища знаходяться у стійкому стані. Це свідчить про те, що запроєктований варіант намівання дамб хвостосховищ до проектних відміток забезпечить їх стійкість у процесі будівництва та експлуатації. Але у зв'язку із закономірним зменшенням гранулометричного складу «хвостів», що викликано підвищенням ефективності збагачення залізородних кварцитів на різних етапах виробництва, все ж таки підвищується небезпека втрати стійкості огорожувальних дамб. Зі зменшенням гранулометричного складу «хвостів» знижується їх динамічна стійкість при накопиченні у хвостосховищі. Для запобігання втраті стійкості на локальних ділянках дамб при повному насиченні ґрунту водою слід передбачити заходи щодо відведення води з тіла дамб.

Висновки. За допомогою математичного моделювання виявлено вплив зменшення гранулометричного складу «хвостів» на переміщення в системі «хвостосховище – основа».

На основі даних аналізу виконаних розрахунків можна зробити висновок, що деформації хвостосховища залежать від стану, в якому воно знаходиться. Виникнення деформацій пояснюється нерівномірністю осідань основи хвостосховища залежно від навантаження.

Осідання хвостосховища потребує постійних інструментальних спостережень, на підставі яких можна обґрунтувати доцільність математичного моделювання розглянутих техногенних процесів.

Література

1. Гірничий енциклопедичний словник. Т.2 / за редакцією В.С. Білецького. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2002. – 632 с.
2. А.с. 1513080 СССР. Способ складирования отходов / Я.М. Адигамов, Н. Кумченко, Б.В. Парий, Е.П. Писанец. Зарегистр. 20.07.88 г.
3. Fourie A.B. Achieving a stable landform with mine tailings: opportunities by the Thickened Tailings technique / A.B. Fourie // Proc. of the XIIIth European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Prague, 2003. – P. 77–83.
4. Використання «хвостів» Полтавського ГЗК при влаштуванні земляних споруд / М.Л. Зоценко // Світ геотехніки – 2005. – №4. – С. 7–11.
5. Fleischer P. Improving structural stability and sealing efficiency of embankments and dykes by using local soil and geosynthetics / P. Fleischer, D. Heyer, G. Heerten // Proc. of the 14th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Geotechnical Engineering in Urban Environments. – Madrid, 2007. – P. 833–839.
6. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики / С.Ф. Клованич. – Запорожье: ООО «ИПО Запорожье», 2009. – 400 с.
7. Клепиков С.Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / С.Н. Клепиков. – К.: НИИСК, 1996. – 202 с.

Надійшла до редакції 02.10.2013
© А.О. Гуржій